

粒状体の変形機構について

信州大学工学部 正会員 小西 純 一

1. 砂・れきのような粒状体の力学的性質の根本的解明には、それらが粒子の集合体である点に立帰って、微視的にみた粒子の挙動から巨視的な特性を説明することが重要な課題である。

ここでは、単純せん断変形を受ける粒状体の挙動を、内部観察が容易で、粒子間伝達力を把握可能な、光弾性2次元粒状体モデルを用いて調べた。

2. 光弾性材料(エポキシ樹脂)で作成した中6, 8, 10 mm, 長さ19 mmの円筒形粒子を 77:154:208の割合で混合し、これらと内寸が165×165 mmの単純せん断枠内につめ、単純せん断試験を行ない、各段階において光弾性等色線と写真撮影しておく。得られた結果を図-1 ~ 3に示す。図-1はせん断変位Dとせん断力Tおよびダイレイタンス $\Delta h/h$ の関係を示している。図-2は垂直荷重Pとせん断力Tの関係を示したもので、ゆるぎめの場合、 $\tan \phi = T/P = 30.6^\circ$ という値と得ている。図-3は、図-1中のL40と記した曲線(P=40 kg)に矢印で示した各せん断段階における光弾性等色線写真である。(a)はせん断力を加える前の状態であり、(b)~(e)はせん断中、(f)はせん断力を0に戻した状態で、残留変位があるまま平衡していることを示している。なお、せん断力は写真下右端に左向きに加えられている。これら一連の写真から観察できることは:

(a) せん断変形の進行につれて、力の伝達される方向が変化する。すなわち(a)では、上下軸に関して左右対称に伝達方向が分布しているのに対し、(b)~(e)では、左上~右下の方向に偏っている。このことは、せん断強度発揮に関連するものと思われる。

(b) 粒状体内の応力状態は決して一様でなく、粒子により荷重分担の割合が異なっている。場所

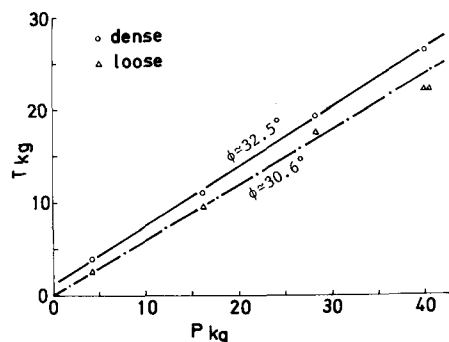


図-2 垂直力-せん断力の関係

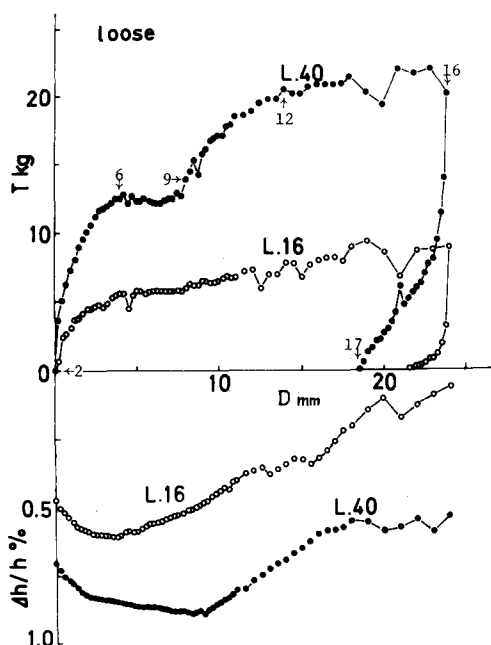
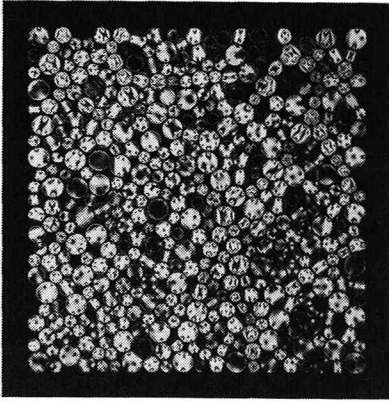
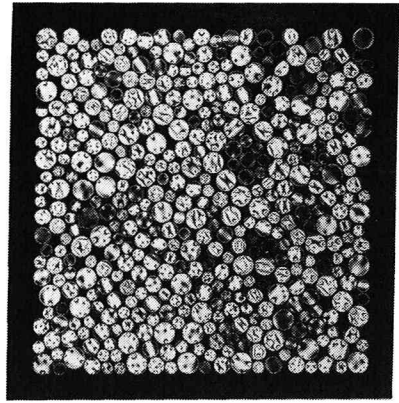


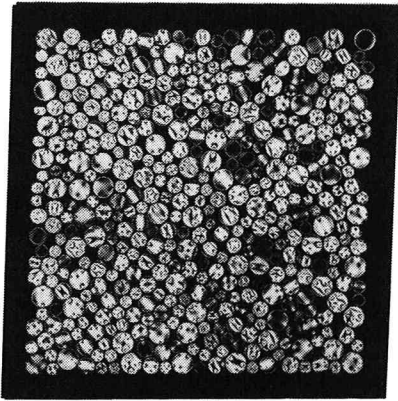
図-1 荷重-変位-高さ変化 曲線 (ゆるぎめ)
L40: P=40 kg, L16: P=16 kg



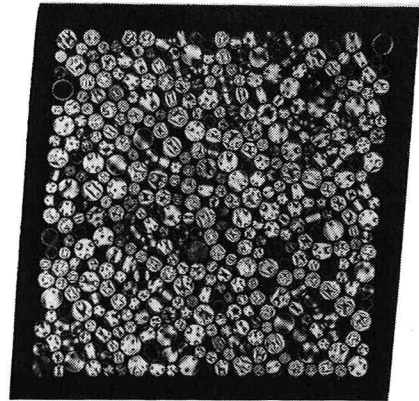
(a) Point 2 せん断前



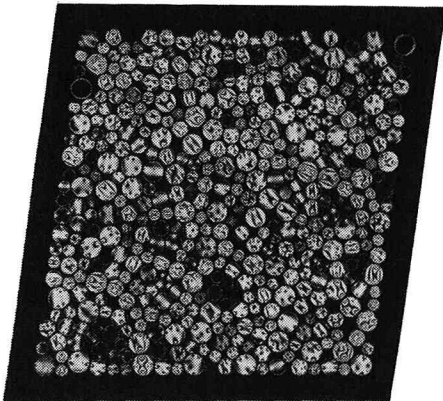
(b) Point 6



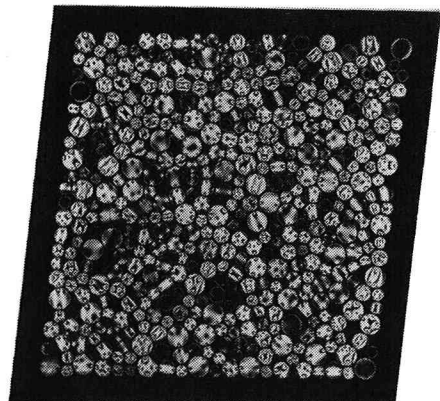
(c) Point 9



(d) Point 12



(e) Point 16



(f) Point 17 隙荷

図-3 せん断の各段階における光弾性等色線写真(図-1中の矢印点)

による差異が存在するようである。

3. 図-3の一連の写真からもわかるように、巨視的には simple なせん断変形も、微視的には決してそうではない現象である。

粒状体内の1つの粒子を考える(図-5)。粒子Aは粒子Bと接点jで接しており、その接線の傾きをせん断力の方向から測って θ_j であるとする(時計回り θ とし $-90^\circ \leq \theta_j < 90^\circ$)。この接点には、粒子間伝達力 f_j が作用しており、その方向は垂直力 N の方向から β_j 傾いている。 θ_j , f_j , β_j の値は接点

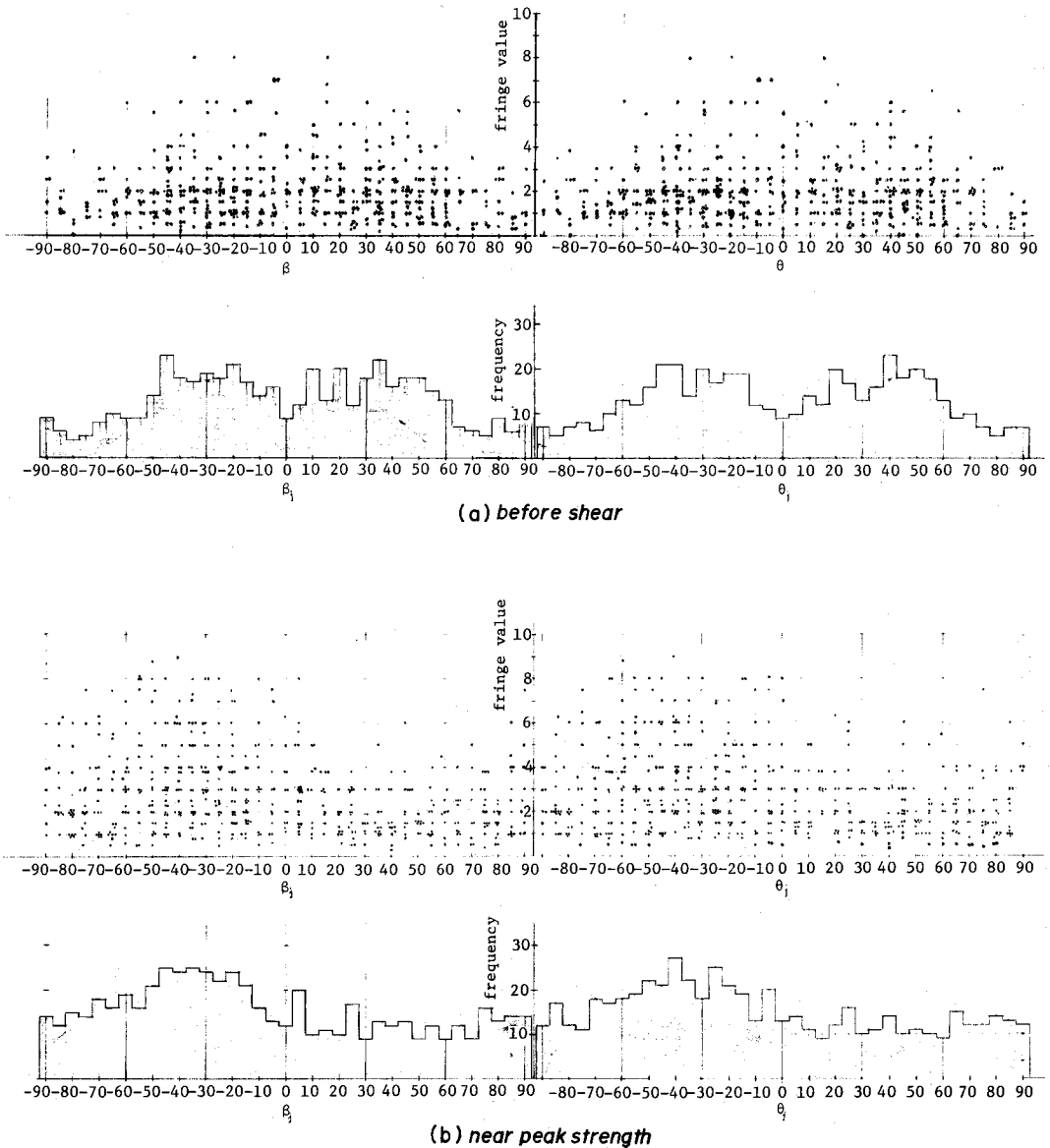


図-4 粒子接触角 θ_j , 粒子間伝達力の大きさ (fringe value) とその方向 β_j の分布

ごとに異なっており、それぞれある頻度分布をなしていると考えられる。
(図-4, 6, 7)。

f_j を垂直力方向の分力 f_{nj} とせん断力方向の分力 f_{sj} とに分解し、これら
を全接点についてそれぞれ合計しにものは、全体の垂直力 P およびせん
断力 T に等しくなるはずであるから、 M は全接点数とすれば

$$\sum_{j=1}^M f_{nj} = \sum_{j=1}^M f_j \cdot \cos \beta_j = P, \quad \sum_{j=1}^M f_{sj} = \sum_{j=1}^M f_j \cdot \sin \beta_j = T$$

$$\therefore \frac{T}{P} = \tan \varphi = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \cdot \sin \beta_j}{\sum_{j=1}^M f_j \cdot \cos \beta_j} \quad (1)$$

したがって、せん断変形の各段階における、右辺の各変数の値とそれ
らの組合せがわかれば、せん断の進行に伴う強度変化が逐次追跡できる。
ところで、図-5 において $\beta_j = \theta_j + \delta$ (δ : 粒子間まっ角) となつたと
きにせん断抵抗が最も大きく、 $\beta_j > \theta_j + \delta$ となれば粒子 A は滑動する。
せん断断内の粒子が一斉にこのような極限状態にあるとすれば式(1)は

$$\tan \varphi = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \sin(\theta_j + \delta)}{\sum_{j=1}^M f_j \cos(\theta_j + \delta)} \quad (2)$$

となる。しかし図-7 に示すように、 $\beta_j - \theta_j$ の値は 0~20 数度の範囲に
分布しており、この仮定からは外れている。(δ の値は実測によると 18°
~25° 位であるが、さらに検討を要する。)

荷重段階によって、 f_j , β_j , θ_j の値の分布が変化ある様子を知らため
図-3 に示した写真から、これらの値を読み取り、図示したのが図-4
である。ここには、せん断前の状態(2)とピーク強度に近い状態(12)に
ついてのみ掲げた。(a) のせん断前の分布状態は、 β_j , θ_j の頻度、伝達
力の大きさ(に比例している先弾性縮次数 ϵ の 8 粒子に換算したもの)の
 β_j , θ_j に対する分布状態とも 0° を中心に対称形となっている。 β_j , θ_j
の平均値は共に +2° であった。ピークが ±40° 付近にあるのは、粒径が
3 種類でありかつ形状が円内であるためである。粒度が連続的な一様分
布かつ粒子形状が不規則ならば、より一様な分布になっているものと想
像される。(b) のピーク強度に近い状態(図-1 の矢印 12 の点) では、
いづれの分布においてもピークが -40° 付近にあつて、 θ_j の平均値は -9° となつて
いる。せん断変形に
対して、対角線方向につばる形で抵抗力を發揮しており、図-6 からわかるように、
伝達力の大きさが大きくなっている。

次の step は、いま示したような特性を基にして、せん断の過程をシミュレートすることであるが
その結果については講演時に述べる。

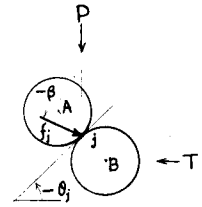


図-5 接触2粒子
 β_j, θ_j は時計回りを+

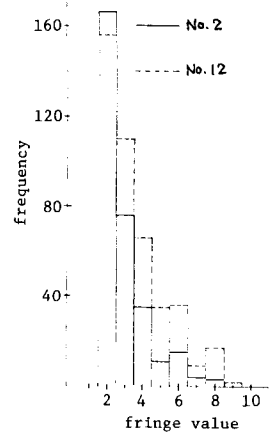


図-6 伝達力の大きさの頻度
分布(縮次数2以上)

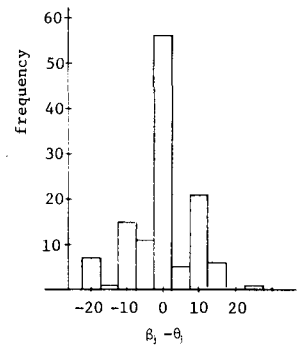


図-7 縮次数4以上の接点における
 $\beta_j - \theta_j$ の頻度分布 (No.12)